

報告番号	甲 第 13628 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 直流高電圧(HVDC)電力機器の複合絶縁構成における電荷挙動と電界推移に関する研究
(Charge Behavior and Electric Field Transition for Composite Insulation Systems in HVDC Power Equipment)

氏 名 中根 龍一

論 文 内 容 の 要 旨

最近の産業界をはじめとする社会情勢は、より高効率、低コスト化、エネルギー安定供給への指向が顕著であり、再生可能エネルギーのような分散したエネルギー資源を統合制御し、高品質で信頼性の高い電力供給が求められている。このような情勢に対処する革新技術の1つとして、直流電力システムは長距離大容量送電や海底ケーブルのような電力系統間や再生可能エネルギーとの連系に適用されている。わが国では、日本国内初の500 kV設計の紀伊水道直流連系設備や海底ケーブル送電、2021年3月運転開始予定の飛騨信濃周波数変換設備における50 Hzと60 Hz系統間の連系などに直流電力システムが適用されている。さらに将来的には、スマートグリッドやFACTS機器、電力貯蔵装置など最新の電力システムの分野への適用も期待されている。したがってこれらの直流電力システムの実現のために、コンパクトで信頼性の高い直流高電圧(HVDC)電力機器が必要不可欠であり、電気絶縁性能向上が強く要請されている。特にその中でも、交直変換用変圧器や直流ガス絶縁開閉装置(DC-GIS)といったHVDC電力機器が挙げられる。

HVDC電力機器内の直流電圧下における電気絶縁現象は未だ詳細に明らかにされていない。その中でも、固体絶縁物上の電荷蓄積や、それに基づく直流電界の発生メカニズムを明らかにし、それらに立脚したHVDC電力機器の電気絶縁性能の検討を行うことが重要である。そこで本研究では、交直変換用変圧器を構成する絶縁油/プレスボード(PB)複合絶縁、DC-GISを構成するSF₆ガス/固体スペーサ複合絶縁を対象とし、直流電圧印加時における電

荷挙動および直流電界の発生・推移メカニズムについて定量的に明らかにするとともに、実験的に検証することを目的としている。さらに、絶縁油とPBの導電率比 σ_{oil}/σ_{PB} とSF₆ガスと固体スペーサの導電率比 σ_{gas}/σ_{EP} を比較することで、導電率比の観点から各々の複合絶縁の相違点について議論していることが特徴である。

第2章では、複合絶縁系における交流電圧印加時と直流定常状態の電界分布特性の違いについて検討し、さらに固体絶縁物の形状や配置が直流定常状態の電界分布特性に及ぼす影響について明らかにした。絶縁油/PB複合絶縁においては、交流印加時はPB内の電界が絶縁油中に押し出される形となり油中に電界が集中する。一方、直流定常状態はPB表面上に電荷が蓄積するため、PB内部に電界が集中する。特に、絶縁油とPBの導電率比 σ_{oil}/σ_{PB} が大きくなるほどPB内部に電界が集中する特性を利用して、PB配置による直流電界分布の制御が可能であることを示した。SF₆ガス/固体スペーサ複合絶縁においては、ガスとスペーサの導電率比 σ_{gas}/σ_{EP} によって直流定常状態の電界分布特性が大きく変化する。導電率比 $\sigma_{EP} > \sigma_{gas}$ の条件においては直流電界分布に対してスペーサの導電性が支配的であり、直流定常状態においても交流印加時とほぼ同一の電界分布特性を示す。しかし、導電率比 $\sigma_{EP} < \sigma_{gas}$ の条件においてはガスの導電性が支配的であり、固体スペーサ界面の電荷蓄積が顕著になるため大きく電界分布が変歪する。そして、双方の条件において絶縁スペーサの形状によって電気絶縁性が大きく異なることを明らかにし、交流印加時と直流定常状態における電極表面上および絶縁スペーサ上に沿ったガス中電界ストレス、異物付着時の沿面電界ストレスの整合性を考慮した絶縁スペーサの最適な形状設計が重要であることを示した。

第3章では、直流定常状態の固体絶縁物上の蓄積電荷密度分布と、それに起因する直流極性反転時の電界ストレスの相関性について、各々の複合絶縁系における電荷挙動に基づき検討した。絶縁油/PB複合絶縁においては、あらかじめ絶縁油中に電荷供給源が多く存在するため、直流定常状態の電界分布の決定には常に絶縁油の導電性が支配的である。そして、直流極性反転時の電界ストレスに対して蓄積電荷がどの程度寄与するか、すなわち寄与率CR(Contribution ratio)を定義することで、直流定常状態のPB上の蓄積電荷による発生電界は直流極性反転時の油中電界ストレスに最大で50%まで寄与し、PB厚さに依存しておよそ20-50%程度であることを定量的に明らかにした。ガス/固体スペーサ複合絶縁においては、電荷供給状態によって複合絶縁系全体の導電特性が決定される。スペーサの導電率が支配的な場合(SCD conditions, $\sigma_{EP} > \sigma_{gas}$)においてはスペーサ内部からの電荷供給が主であると考えられ、直流定常状態においては電荷蓄積による電界変歪はほとんど見られない。しかし、ガスの導電性が支配的な場合(GCD conditions, $\sigma_{EP} < \sigma_{gas}$)においては電極表面粗さによる電界電子放出や、突起異物による部分放電のような顕著な電荷供給源が考えられる。したがって、直流定常状態において蓄積電荷による電界変歪が著しく生じ、さらにその蓄積電荷量が直流極性反転時のガス中電界ストレスを決定付ける主要因であることを定量的に明らかにした。

第4章では、直流電圧印加時の複合絶縁系における直流印加直後から直流定常状態まで

の電界ストレスの時間および空間推移特性について検討した。絶縁油/PB 複合絶縁においては、直流印加直後から直流定常状態に時間推移するにつれて PB 上の電荷蓄積により PB 内部に電界が集中していく。このとき油中電界の時定数 τ はおよそ 10 - 1,000 s である。さらに、電界空間の場所によって油中電界の時間変化特性が大きく異なり、最大電界の場所も変化する。特に、PB 表面上の蓄積電荷による影響で、直流電圧印加直後から直流定常状態に至る過程で、油中電界が最大ピーク値を発現する場所があり、電気絶縁性能的に最も厳しくなる条件が生じる可能性があることを明らかにした。ガス/固体スペーサ複合絶縁においては、複合絶縁系の導電状態によってガス中電界の時定数 τ が異なる。ガスの導電性が支配的な場合、時定数 τ はおよそ 400 - 500 h、スペーサの導電性が支配的な場合、時定数 τ は 3,000 - 4,000 h のオーダーであることを示した。特にガスの導電性が支配的である場合においては、絶縁油/PB 複合絶縁と同様に電界空間の場所によってガス中電界の時間変化特性が異なり、最大電界の場所が移り変わっていく。さらに、直流印加直後から直流定常状態における時間変化において直流印加直後におけるガス中電界ストレスよりも高いストレスが生じることがあることから、その最大電界値に基づいた絶縁設計を反映することで、より合理的かつ信頼性の高い直流電気絶縁性能の確立が可能であることを示した。

第 5 章では、ガス/固体複合絶縁における部分放電下の電荷蓄積過程について、針-平板電極系を用いて実測と解析の両面から検討を行った。基礎的な絶縁媒質である空気と PMMA の複合絶縁と、GIS 内部絶縁を模擬した SF₆ ガスとシリカ充填エポキシの複合絶縁において、負極性直流電圧を固体絶縁上の蓄積電荷が十分に飽和傾向を示すまで印加した。それと同時に、蓄積電荷によって発生した固体絶縁物上の表面電位、部分放電によって生じる放電電流、発光強度および針電極先端の微弱な発光像を取得した。加えて、部分放電による等価的な負イオン密度の生成率を実測に基づき算出し、解析モデルに適用することで、部分放電下の電荷挙動を考慮した電界解析手法を構築した。その結果、直流印加直後から固体絶縁物上の電荷蓄積によって針電極先端の部分放電が抑制される直流定常状態までの、固体絶縁物上の表面電位の時間推移の実測値と解析値が概ね一致し、解析モデルの有用性を検証した。さらに、部分放電によって形成されるガス中の高導電率領域を定量的に評価し、固体絶縁物上の電荷蓄積による電界変歪によって高導電率領域が偏向する。特に、ガス中の高導電率領域の時間進展にともない、電荷が主に蓄積する場所も時間推移することから、部分放電によって形成されたガス中の高導電率領域は、ガス/固体複合絶縁の電荷蓄積過程を決定付ける主要因であることを定量的に明らかにした。

第 6 章では、絶縁油/PB 複合絶縁の交直変換用変圧器実器モデルおよびガス/固体スペーサ複合絶縁のガス中実形状絶縁スペーサモデルを用いて、各々の直流電力機器における試験電圧条件を提案し、それらの値に基づいた電気絶縁性能の検討を行った。交直変換用変圧器実器モデルにおいては、絶縁油と PB の導電率比 σ_{oil}/σ_{PB} が大きくなるほど直流定常状態において電界分布 PB 配置依存特性が顕著になるとともに、油中の電界ストレスが緩和される。しかし、その分 PB 表面上の蓄積電荷が増大し、直流極性反転時においては、外部電界

と重畳することで油中に電気絶縁性能的に厳しい電界ストレスが生じる。したがって、直流定常状態に達する十分な印加電圧時間の後、直流極性反転を行うことで交直変換用変圧器の第1油道部分における電気絶縁性能を評価することができることを示した。実形状絶縁スペーサモデルにおいては、スペーサの導電性が支配的である場合(正常状態)、直流定常状態において絶縁スペーサ表面上の電荷蓄積が顕著に表れないため、それにともない直流極性反転時においてガス中に電界ストレスはそれほど生じない。しかし、ガスの導電性が支配的である場合(異常状態)、直流定常状態において絶縁スペーサ表面上の電荷蓄積が顕著に表れる。さらに直流極性反転時には高電圧電極表面上におけるガス中に電気絶縁性能的に厳しい電界ストレスが生じる。したがって、直流試験の際にはガスの導電性が支配的な場合を想定した直流定常状態に達する十分な印加電圧時間の後、直流極性反転を行うことで、GIS内部の正常および異常状態を評価することができることを示した。

以上より、本研究では HVDC 電力機器内部を構成する絶縁油/PB 複合絶縁および SF₆ ガス/固体スペーサ複合絶縁における電荷挙動および電界の発生・推移メカニズムを解析と実験の両面から定量的に明らかにし、合理的かつ信頼性の高い電気絶縁設計に貢献したと考えられる。